

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Luka ŽAKELJ

**VPLIV ČASA STISKANJA NA TRDNOST LEPILNEGA SPOJA IZ  
UTEKOČINJENEGA LESA**

DIPLOMSKI PROJEKT  
Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja

**INFLUENCE OF PRESSING TIME ON THE SHEAR STRENGTH OF  
LAP JOINTS BONDED WITH LIQUEFIED WOOD**

B. SC. THESIS

Ljubljana, 2012

Diplomski projekt je zaključek Visokošolskega strokovnega študija Tehnologije lesa in vlaknatih kompozitov prve stopnje. Opravljen je bil v laboratoriju Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin, Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, kjer so bile opravljene vse laboratorijske analize.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega projekta imenoval izr. prof. dr. Milana Šerneka, za recenzenta pa viš. pred. mag. Bogdana Šego.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Luka Žakelj

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Dv1  
DK 630\*824.8  
KG lepilni spoj/utekočinen les/čas stiskanja/strižna trdnost/trajnost  
AV ŽAKELJ, Luka  
SA ŠERNEK, Milan (mentor)/ŠEGA, Bogdan (recenzent)  
KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII /34  
ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo  
LI 2012  
IN VPLIV ČASA STISKANJA NA TRDNOST LEPILNEGA SPOJA  
IZ UTEKOČINJENEGA LESA  
TD Diplomski projekt (Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja)  
OP XI, 52 str., 5 pregl., 12 sl., 31 pril., 16 vir.  
IJ sl  
JI sl/en  
AI Poleg drugih alternativ bi tudi utekočinen les lahko v prihodnje uporabljali kot lepilo in tako pripomogli k ohranitvi čistega okolja. Proučili smo vpliv časa stiskanja na strižno trdnost lepljencev, zlepljenih z utekočinjenim lesom. Utekočinen les smo pripravili na osnovi podatkov iz prejšnjih raziskav v masnem razmerju med lesom in etilen glikolom 1:1, z dodatkom katalizatorja (3 % mase etilen glikola). Da bi lahko proučili vpliv časa stiskanja na trdnost lepilnega spoja, smo bukove lamele stiskali 6, 9, 12, 15 in 18 min v skladu s standardom EN 12765 (2002). Preizkušance smo razžagali iz dvoslojnih bukovih lepljencev in jih nato testirali z univerzalnim testnim strojem ZWICK/Z005. Testiranje smo opravili takoj po lepljenju in nato še po 1, 3, 7, 14 in 28 dneh. Ugotovili smo, da preizkušanci, ne glede na čas stiskanja, niso zadovoljevali zahtev standarda EN 12765 (2002). Najvišjo strižno trdnost so dosegli preizkušanci stiskani 18, 15 ter 12 min. Vsi ti preizkušanci so izkazovali dokaj konstantne lastnosti in strižna trdnost ni bila odvisna od časa stiskanja. Najvišje ocene loma po lesu lepilnega spoja (nad 85 %) so prav tako dosegli po 18 min stiskani preizkušanci; ostali preizkušanci, stiskani krajši čas, pa so izkazovali slabše lastnosti.

#### KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dv1  
DC 630\*824.8  
CX adhesive bond/liquefied wood/pressing time/shear strength/durability  
AU ŽAKELJ, Luka  
AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/ŠEGA, Bogdan (reviewer)  
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII /34  
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science  
and Technology  
PY 2012  
TI INFLUENCE OF PRESSING TIME ON THE SHEAR STRENGTH OF LAP  
JOINTS BONDED WITH LIQUEFIED WOOD  
DT B. SC. Thesis  
NO XI, 52 p., 5 tab., 12 fig., 31 ann., 16 ref.  
LA sl  
AL sl/en  
AB Liquefied wood is one of the alternatives that should be used in the future as an adhesive, and it should help to maintain clean environment. The influence of pressing time on specimens bonded with liquefied wood was studied as a function of time after the bonding. Liquefied wood was prepared on the basis of data from previous studies in the mass ratio between the wood and ethylene glycol 1:1; with addition of a catalyst (3 % of the weight of ethylene glycol). To study the influence of pressing time on the shear strength the beech lamellas were pressed in accordance with the regulations of EN 12765 (2002) at 5 different times: 6, 9, 12, 15 and 18 min. The specimens were sawed from 2-layer beech assemblies and then tested on the universal testing machine ZWICK/Z005. Testing was conducted immediately after the bonding and then after 1, 3, 7, 14 and 28 days. It was found out that specimens bonded together with any of pressing times did not satisfy the requirements of EN 12765 (2002) standard. Specimens bonded with pressing time of 18 min achieved the highest results in the shear strength, closely followed by the specimens bonded with pressing time of 15 and 12 min. Specimens bonded at these 3 times achieved fairly constant results, and their values did not decline as a function of time after the bonding. The bonded specimens pressed for 18 min also reached the highest estimates of wood failure of adhesive bond (over 85 %); the specimens bonded with other pressing times achieved poor results.

## KAZALO VSEBINE

	str.
<b>Ključna dokumentacijska informacija (KDI) .....</b>	<b>III</b>
<b>Key Words Documentation (KWD) .....</b>	<b>IV</b>
<b>Kazalo vsebine .....</b>	<b>V</b>
<b>Kazalo preglednic.....</b>	<b>VII</b>
<b>Kazalo slik.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Kazalo prilog.....</b>	<b>IX</b>
<b>Okrajšave in simboli .....</b>	<b>XI</b>

<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 Opredelitev problema	1
1.2 Cilj diplomskega projekta	2
<b>2 PREGLED OBJAV .....</b>	<b>3</b>
2.1 Utekočinjen les	3
2.2 Uporaba utekočinjenega lesa	3
<b>2.2.1 Utekočinjen les kot gorivo</b>	<b>3</b>
<b>2.2.2 Utekočinjen les kot dodatek k poliuretanskim penam</b>	<b>3</b>
<b>2.2.3 Utekočinjen les - fenol-formaldehidna smola</b>	<b>4</b>
<b>2.2.4 Utekočinjen les - epoksi smola</b>	<b>4</b>
<b>2.2.5 Utekočinjen les kot lepilo</b>	<b>4</b>
2.3 Pregled relevantne literature o lepljenju lesa z utekočinjenim lesom	5
<b>2.3.1 Kinetika in mehanizmi utekočinjanja lesa</b>	<b>5</b>
<b>2.3.2 Utekočinjen les z dodatkom sintetičnih smol in tanina</b>	<b>5</b>
<b>2.3.3 Vpliv vrednosti pH UL na strižno trdnost in trajnost zlepljenih spojev</b>	<b>6</b>
<b>3 MATERIAL IN METODE.....</b>	<b>8</b>
3.1 Les	8
<b>3.1.1 Topol (<i>Populus ssp.</i>)</b>	<b>8</b>
<b>3.1.2 Bukev (<i>Fagus sylvatica L.</i>)</b>	<b>8</b>
3.2 Kemikalije	9
<b>3.2.1 Etilen glikol</b>	<b>9</b>
<b>3.2.2 Žveplova kislina</b>	<b>9</b>
<b>3.2.3 Dioksan</b>	<b>10</b>
3.3 Utekočinjanje lesa	10
3.4 Lepljenje lesenih lamel z utekočinjenim lesom	12
3.5 Izdelava strižnih preizkušancev	13
3.6 Testiranje strižne trdnosti zlepljenih preizkušancev	13
<b>4 REZULTATI .....</b>	<b>15</b>
4.1 Strižna trdnost zlepljenih spojev z UL pri času stiskanja 6 min	15
4.2 Strižna trdnost zlepljenih spojev z UL pri času stiskanja 9 min	15
4.3 Strižna trdnost zlepljenih spojev z UL pri času stiskanja 12 min	16

4.4	Strižna trdnost zlepiljenih spojev z UL pri času stiskanja 15 min	16
4.5	Strižna trdnost zlepiljenih spojev z UL pri času stiskanja 18 min	17
4.6	Odvisnost strižne trdnosti lepilnega spoja iz UL od časa stiskanja	18
4.7	Primerjava ocene loma po lesu glede na čas stiskanja	19
<b>5</b>	<b>RAZPRAVA IN SKLEPI .....</b>	<b>20</b>
5.1	Razprava	20
5.2	Sklepi	21
<b>6</b>	<b>VIRI.....</b>	<b>22</b>

## ZAHVALA

## PRILOGE

## KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ter loma po lesu pri času stiskanja 6 minut v odvisnosti od časa po lepljenju .....	15
Preglednica 2: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ter loma po lesu pri času stiskanja 9 minut v odvisnosti od časa po lepljenju .....	15
Preglednica 3: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ter loma po lesu pri času stiskanja 12 minut v odvisnosti od časa po lepljenju .....	16
Preglednica 4: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ter loma po lesu pri času stiskanja 15 minut v odvisnosti od časa po lepljenju .....	16
Preglednica 5: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ter loma po lesu pri času stiskanja 18 minut v odvisnosti od časa po lepljenju .....	17

## KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Etilen glikol.....	9
Slika 2: Žveplova kislina.....	10
Slika 3: 1,4-Dioksan.....	10
Slika 4: Odstranjevanje netopnih ostankov.....	11
Slika 5: Laboratorij za izdelavo UL .....	11
Slika 6: Shematičen prikaz utekočinjenja lesa .....	12
Slika 7: Laboratorijska stiskalnica .....	12
Slika 8: Shematski prikaz izdelanega preizkušanca.....	13
Slika 9: Univerzalni testirni stroj Zwick .....	14
Slika 10: Čeljusti testirnega stroja.....	14
Slika 11: Primerjava strižnih trdnosti v odvisnosti od časa .....	18
Slika 12: Primerjava loma po lesu v odvisnosti od časa .....	19

| Kazalo ni identično podnaslovom slik v nadaljevanju!

## KAZALO PRILOG

Priloga A: Mase filtrov, ki so potrebne pri izračunu DUL po enačbi (1) (mase podane v gramih)

Priloga B: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni takoj po lepljenju.

Priloga C: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni takoj po lepljenju.

Priloga D: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni takoj po lepljenju.

Priloga E: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni takoj po lepljenju.

Priloga F: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni takoj po lepljenju.

Priloga G: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni 1 dan po lepljenju.

Priloga H: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni 1 dan po lepljenju.

Priloga I: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni 1 dan po lepljenju.

Priloga J: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni 1 dan po lepljenju.

Priloga K: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni 1 dan po lepljenju.

Priloga L: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni 3 dni po lepljenju.

Priloga M: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni 3 dni po lepljenju.

Priloga N: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni 3 dni po lepljenju.

Priloga O: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni 3 dni po lepljenju.

Priloga P: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni 3 dni po lepljenju.

Priloga Q: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni 7 dni po lepljenju.

Priloga R: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni 7 dni po lepljenju.

Priloga S: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni 7 dni po lepljenju.

Priloga T: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni 7 dni po lepljenju.

Priloga U: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni 7 dni po lepljenju.

Priloga V: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni 14 dni po lepljenju.

Priloga W: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni 14 dni po lepljenju.

Priloga X: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni 14 dni po lepljenju.

Priloga Y: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni 14 dni po lepljenju.

Priloga Z: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni 14 dni po lepljenju.

Priloga AA: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni 28 dni po lepljenju.

Priloga BB: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni 28 dni po lepljenju.

Priloga CC: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni 28 dni po lepljenju.

Priloga DD: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni 28 dni po lepljenju.

Priloga EE: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni 28 dni po lepljenju.

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

UL – utekočinjen les

EG – etilen glikol

## 1 UVOD

V zadnjih desetletjih smo začeli pogosteje razmišljati o prihodnosti našega planeta in skrbeti za zmanjšanje onesnaževanja. V preteklosti smo svet onesnaževali z veliko količino ekološko spornih emisij, ki so se nabirale v našem bivalnem okolju ter povzročale veliko zdravstvenih in okoljevarstvenih težav. Vse bolj smo se začeli zavedati, da je te težave možno rešiti z uporabo in izdelavo materialov, ki niso ekološko sporni in bodo v prihodnosti popolnoma nadomestili škodljive materiale.

V lesni industriji se lahko na tem področju naredi veliko. Prav na vsakem področju lahko naredimo izboljšave, ki bi lahko pripomogle k boljši kvaliteti življenja. Z novo tehnologijo in veliko novega znanja smo izboljšavam blizu, najprej pa jih je potrebno dobro proučiti in sele nato realizirati v proizvodnji.

Evropska unija si v zadnjih letih prizadeva zmanjšati emisije okolju škodljivih snovi in uveljaviti materiale, ki so pridobljeni iz obnovljivih virov, pri čemer bo morala sodelovati tudi lesna industrija. V lesarstvu še vedno v prekomernih količinah uporabljamo sintetične materiale, pridobljene iz neobnovljivih virov - predvsem nafte. Ti materiali se v večini uporablajo v površinski obdelavi ter tudi pri lepilih. Večina lepil, ki se uporablja v lesni industriji, je izdelanih iz neobnovljivih virov (nafte, kot osnovni vir) in so tako problematična z vidika okolja ter tudi iz vidika potrošnje tega vira surovine.

Utekočinjen les je ena od alternativ, ki naj bi se v prihodnosti uporabljal kot lepilo v lesni industriji in tako pripomogel k ohranitvi čistega okolja. Utekočinjen les je še nerazvita ideja, ki jo je potrebno še dobra proučiti in razviti, da bo lahko uspešno nadomestil sintetična lepila. Snov, kot je utekočinjen les, se pridobiva z degradacijo komponent lesa (celuloza, hemiceluloza in lignin) s sintetičnimi topili, kar je določena slabost, saj v celoti ni izdelan iz povsem ekološko sprejemljivih materialov, ampak je še vseeno, če gledamo iz vidika porabljenih količin osnovne surovine pri sintetičnih lepilih, veliko boljši.

### 1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Utekočinjen les ima več pomanjkljivosti, kot so npr. manjša trajnost in trdnost lepilnega spoja. V preteklosti se je naredilo več različnih poizkusov, pri katerih so s pomočjo mešanice sintetičnih lepil ter utekočinjenega lesa poskušali izboljšati trajnost in trdnost lepilnega spoja. Ugotovljeno je bilo, da mora biti delež sintetičnih lepil velik (tudi 80 %), da zadostuje kriterijem standarda EN 12765 (2002), zato so začeli raziskovati tehnološke parametre (čas stiskanja, temperatura stiskanja, tlak stiskanja, pH utekočinjenega lesa...), ki bi pripomogli k izboljšanju kvalitete lepilnega spoja iz utekočinjenega lesa (Ugovšek in Šernek, 2011).

## 1.2 CILJI DIPLOMSKEGA PROJEKTA

Glavni cilj diplomskega projekta je ugotoviti strižno trdnost lepilnega spoja pri preizkušancih zlepljenih z utekočinjenim lesom pri različnih časih stiskanja. Poleg tega je cilj raziskave ugotoviti tudi vpliv časa po lepljenju na strižno trdnost lepilnega spoja.

Predvidevamo, da dalj časa, ko stiskamo lepljence, bolje se bo utekočinjen les utrdil in tako omogočil trdnejši spoj. Vemo tudi, da po določenem času lepilni spoji iz utekočinjenega lesa popustijo, prav to pa nam onemogoča učinkovito uporabo utekočinjenega lesa kot lepila.

## 2 PREGLED OBJAV

### 2.1 UTEKOČINJEN LES

Če si predstavljamo, da je les po strukturi kompleksen trden material, sestavljen v glavnem iz polimernih molekul celuloze, hemiceluloze in lignina, potem z utekočinjanjem to razgradimo na bolj enostavne, tekoče, manjše gradnike. Produkt reakcije je gosta temnorjava tekočina, imenovana utekočinjen les (Kranjec, 2010).

Če les segrevamo brez pristopa kisika, se njegova razgradnja pričenja med 270 °C in 280 °C, ko nastopijo eksotermne reakcije. Nad 380 °C pridobimo s suho destilacijo lesa predvsem ocetno kislino, metanol, katran in plinske produkte. Preostanek je oglje. Tako lahko rečemo, da pri pirokitski razgradnji lesa dobimo tekočo frakcijo, čeprav je glavni namen karbonizacija in nastanek oglja (Tišler, 2002).

Če pogoje spremenimo in les v ustrezrem topilu in v vodikovi atmosferi segregemo na 250 °C – 400 °C pri tlaku 280 barov, se ob uporabi katalizatorjev utekočini. Tekoči les vsebuje poleg plinov težka olja ter velik delež ogljikovodikov in fenolov.

V drugi polovici 20. stoletja je bilo objavljenih mnogo raziskav, ki opisujejo utekočinjanje lesa pod sorodnimi, vendar vedno zahtevnimi pogoji. Tako je uspelo pri 230 barih in v temperaturnem območju med 150 °C in 360 °C utekočiniti 94,1 % topolovine in 82,5 % smrekovine. Nekateri so ta postopek imenovali kar "oljenje", saj so bila najpomembnejši produkt olja, ki se lahko uporabijo kot izhodna surovina za pridobivanje raznih proizvodov in lahko rabijo kot nadomestek petrokemičnim izdelkom oz. naftnim derivatom (Tišler, 2002).

V zadnjih desetletjih so bili razviti novi postopki utekočinjenja lesa pod blažjimi pogoji. Prevladujoča načina utekočinjenja lesa pod normalnim tlakom in pri povišani temperaturi sta utekočinjenje s poliolji (polihidričnimi alkoholi) in utekočinjenje s fenoli.

### 2.2 UPORABA UTEKOČINJENEGA LEZA

#### 2.2.1 Utekočinjen les kot gorivo

Utekočinjen les lahko uporabljamo kot gorivo, saj lahko predvidevamo, da se bodo fosilna goriva v prihodnosti občutno podražila ali pa jim bodo zaloge pošle. To predstavlja veliko prednost za utekočinjen les. Tako gorivo ima boljšo kurično vrednost kot sam masivni les (drva), kar pomeni boljšo izkoriščenost lesa in tako sproščenih manj škodljivih emisij v okolje.

#### 2.2.2 Utekočinjen les kot dodatek k poliuretanskim penam

Uporablja se ga tudi za pripravo poliuretanskih pen za uporabo v gradbeništvu kot izolacijski material. Ta pena v celoti ni sestavljena iz utekočinjenega lesa, ampak je narejena iz sintetičnih materialov z dodatkom utekočinjenega lesa, katerega je okoli 30 %, lahko tudi 40 %. Tako oplemenitene pene so bolj dimenzijsko stabilne ob minimalnem povečanju koeficiente toplotne prevodnosti pene.

### **2.2.3 Utekočinjen les - fenol-formaldehidna smola**

Fenol-formaldehidno smolo dobimo, če les utekočinjamo s fenolom v kislem mediju in mu dodamo formaldehid, tako dobimo odlično novolak smolo. Prednost te sinteze je v tem, da formaldehid deluje tako, da v smoli nimamo fenola, ki bi bil nezreagiran. Te smole se v tekočem stanju obnašajo podobno kot komercialne novolak smole. Utrjeni produkti iz utekočinjenega lesa fenol-formaldehidnih smol imajo celo boljše mehanske lastnosti kot ostale komercialne fenolne smole.

Nekateri raziskovalci so opravili raziskavo pri kateri so lepili furnirja debeline 1 mm. Potekala je v stiskalnici 30 sekund pri temperaturi od 120 °C do 130 °C. Pri raziskavi so ugotovili, da imajo fenolna lepila, izdelana iz petih delov lesnih sekancev in dveh delov fenola, enake lepilne lastnosti kot komercialna fenolna lepila. Ugotovljeno je bilo tudi, da je uporabljena temperatura stiskanja tudi 15 °C nižja kot je predpisana za komercialna fenolna lepila (Tišler, 2002).

### **2.2.4 Utekočinjen les - epoksi smola**

Kadar utekočinjen les reagira z epoksi spojinami, dobimo nove vrste smol. Pri proučevanju pogojev utrjevanja in njihovih lastnosti so kot epoksi komponente izbrali tetraeten glikol diglicidil eter (TEGDGE), dieten glikol diglicidil eter (DEGDGE) in eten glikol diglicidil eter (EGDGE) kot tudi diglicidil eter bisfenola (DGEBA). Utrjevalec je bil trieten tetramin (TETA). Pod pogoji, ki so jih spremljali, so dobili smole, za katere so ugotovili, da se njihove lastnosti izboljšujejo s povišanjem deleža utekočinjenega lesa. Sorodne ugotovitve veljajo tudi za smole, ki so jih pridobili iz lignina namesto iz lesa. Lignina, ki je stranski produkt pri pridobivanju celuloze, niso utekočinili, pač pa le raztopili v 1 % raztopini NaOH pri 60 °C, mešali z epoksi smolami in dodali utrjevalec (Tišler, 2002).

V obeh navedenih primerih so na teflonskih ploščah izdelali utrijene filme, katerih obstojnost so nato preizkusili v topilih kot sta DMF in aceton in ugotavliali njihove lastnosti. Na omenjena načina so pridobili celo paleto novih še nepoznanih smol z različnimi lastnostmi in s tem z različnimi možnostmi za njihovo uporabo (Tišler, 2002).

### **2.2.5 Utekočinjen les kot lepilo**

Les lahko utekočinimo tako, da nam na koncu ostane samo utekočinjen les brez snovi, ki so potrebne za samo utekočinjanje. V prihodnosti najbolj računamo, da bo tako utekočinjen les uporaben kot lepilo. Predvsem se ga lahko uporablja v proizvodnji lesnih kompozitov (vezane, OSB, iverne ter vlaknene plošče). Lahko tudi predvidevamo, da bi se kot lepilo uporabljalo tudi v proizvodnji konstrukcijskega lesa kot na primer lepljeni nosileci. Lahko bi se ga uporabljalo tudi v pohištveni industriji, vendar moramo upoštevati, da je lepilni spoj zlepljen z utekočinjenim lesom črne barve in je zato bolj opazen.

## 2.3 PREGLED RELEVANTNE LITERATURE O LEPLJENJU LESA Z UTEKOČINJENIM LESOM

### 2.3.1 Kinetika in mehanizmi utekočinjanja lesa

Utekočinjanje je proces degradacije osnovnih komponent lesa (celuloza, hemiceluloza ter lignin) ob uporabi različnih vrst topil. Najpogosteje uporabljeni topili so fenol, polihidrični alkoholi, ciklični karbonati in ionske tekočine. Reakcijo utekočinjanja pa sproži katalizator, za katerega lahko uporabimo različne kisline kot so: žveplova kislina, para-toluen sulfonska kislina, fosforna kislina, klorovodikova kislina ali natrijev hidroksid. Med samim procesom utekočinjanja lesni polimeri razpadajo na monomere in oligomere (intermediata), kateri v nadaljevanju reagirajo med sabo ali s topilom, pri čemer nastaja produkt, ki je netopen v vodi in različnih topilih. Tako lahko celoten proces utekočinjanja razdelimo na tri dele: degradacijo lesnih komponent, nastanek intermediatov ter reakcijo intermediatov med sabo ali s topilom (rekondenzacija). Sama kinetika utekočinjanja lesa ni odvisna samo od topila in katalizatorja, ampak tudi od vrste lesa (Ugovšek in Šernek, 2011).

Zaradi heterogene zgradbe lesa je proces utekočinjenja lahko izredno kompleksen. V največji meri je mehanizem utekočinjenja odvisen od količine ter vrste reagenta, ki vstopa v reakcijo skupaj z lesom in katalizatorjem. Katalizator ima prav tako velik pomen ne samo med procesom utekočinjanja, ampak tudi pri t.i. rekondenzaciji utekočinjenih produktov. Utekočinjanje lesa lahko razumemo kot kompleksno kombinacijo več vzporednih reakcij degradacije celuloze, hemiceluloze ter lignina, poleg tega pa vzporedno nastajajo tudi produkti utekočinjanja, ki predstavljajo vstopne molekule za nadaljnjo rekondenzacijo. Sama rekondenzacija je med utekočinjanjem nezaželena. Ampak po navedbah v literaturi se po rekondenzaciji formira polimer, ki je netopen v vodi ter različnih topilih kar bi lahko predstavljalo uporaben pojav v primeru lepljenja z utekočinjenim lesom (Ugovšek in Šernek, 2011).

### 2.3.2 Utekočinjen les z dodatkom sintetičnih smol in tanina

Utekočinjen les (UL) je obetaven naravni material, ki se lahko uporablja kot lepilo. Vendar imajo lepilni spoji, izdelani iz samo UL, nizko življenjsko dobo. V preteklosti so bile opravljene raziskave z namenom povečanja trajnosti lepilnih spojev zlepljenih z zmesjo pripravljeno iz UL in dodanim sintetičnim lepilom ali dodanim taninom. V zvezi z pripravo takih zmesi so bile izvedene številne študije. Proučevali so sisteme na osnovi UL in epoksi smol (Kobayashi in sod., 2000, 2001; Asano in sod., 2007; Wu in Le, 2010), sisteme na osnovi mešanic med UL in sintetičnimi smolami kot so: diizocianati (Juhaida in sod., 2010), urea-formaldehidna smola (Antonović in sod., 2010), melamin-urea-formaldehidna smola (Kunaver in sod., 2010) in fenol-formaldehidna smola (Ugovšek in sod., 2010). Izkazalo se je, da imajo taki sistemi veliko pomanjkljivost v majhnem deležu lesa. Če vzamemo primer, da naredimo UL v razmerju les/topilo 1:3 imamo po utekočinjanju v produktu še 25 % lesa. Ko pa na koncu, pripravimo tak sistem mešanice UL in sintetičnih smol, da zadovoljuje zahteve standardov, pa je samega lesa še samo 6,25 %. To bi lahko izboljšali z večjim razmerjem les/topilo, na primer 1:2 ali celo 1:1 (Ugovšek in sod., 2011).

Nizko trajnost vezi zlepljenih z UL bi lahko potencialno izboljšali z dodajanjem kemičnih snovi, ki bi pripomogle k boljši povezanosti elementov UL. Z namenom ustvariti okolju prijazno lepilo, so nekateri znanstveniki poskušali uporabiti naravne snovi, ki bi se uporabljale kot del lepilne mešanice. Tanin je eden izmed najuporabnejših naravnih virov kot dodatek lepilu za les. Razdelimo ga lahko na dva razreda, ki temeljita na njegovi kemični strukturi: hidroliziran ali kondenziran tanin. Kondenziran tanin se zaradi visoke reaktivnosti lahko doda UL in tako pri visoki temperaturi reagira s prostim fenolom ali alkoholnimi hidroksidi, ki se nahajajo v UL. Opravljena je bila raziskava v kateri so proučili štiri različne mešanice: UL pripravljen v razmerju les/topilo 1:1, UL v razmerju les/topilo 1:3, UL v razmerju les/topilo 1:1 z dodatkom kondenziranega tanina (CT) in UL v razmerju les/topilo 1:3 z dodatkom CT. Ugotovljeno je bilo, da je izhlapevanje etilen glikola prispevalo k boljši trajnosti, dodajanje kondenziranega tanina pa ni bistveno prispevalo k boljši vzdržljivosti ali večji strižni trdnosti zlepljenih preizkušancev. Rezultati te raziskave so pokazali, da UL z manjšim deležem etilen glikola (razmerje mase les/topilo 1:1) predstavlja boljše rezultate kot UL z večjim deležem etilen glikola (masno razmerje les/topilo 1:3), in da dodatek kondenziranega tanina ni prispeval k izboljšanju kakovosti lepljenja (Ugovšek in sod., 2011).

### 2.3.3 Vpliv vrednosti pH UL na strižno trdnost in trajnost zlepljenih spojev

Ena od možnosti rešitve težav z utekočinjenim lesom (prenizka strižna trdnost in trajnost zlepljenih spojev) je tudi narediti UL z optimalnim pH, ki bi izboljšal pomanjkljivosti. Ugovšek ter sod. so naredili raziskavo v kateri so pripravili UL z različnimi vrednosti pH, ki so jih uravnavali z dodajanjem 10 M raztopine natrijevega hidroksida ( $\text{NaOH}_{\text{aq}}$ ). UL so pripravili iz žagovine topola, kot reagent so uporabili etilen glikol (EG) in kot katalizator 97 % žveplovo(VI) kislino. Masno razmerje med topolovino in EG je bilo 1:3, dodatek katalizatorja pa je znašal 3 % glede na maso EG. Pripravili so 5 različnih vrednosti pH UL, ki so jih izmerili z pH metrom (Mettler Toledo, SevenEasy, pH meter S20) in ugotovili, da je vrednost pH UL brez dodanega NaOH negativna (-0,5) ostale 4 vrednosti pa so znašale od 0,24 do 5,2 (Ugovšek in sod., 2011).

Negativna vrednost pH je kljub nepoznavanju povsem logična, saj je pH definiran kot negativni desetiški logaritem aktivnosti  $\text{H}^+$  ionov v raztopini ( $\text{pH} = - \log[a(\text{H}^+)]$ ). Znanstveniki poročajo o negativnem pH tudi v drugih snoveh kot so vulkanski izvor vode (pH -1,7), voda iz kraterskih jezer (pH -0,89) in rudniške vode (pH -3,6). Razlog za negativen pH v UL je najverjetneje dodatek žveplove kisline in neznaten delež vode, ki je posledica izparevanja EG pri temperaturi nad 180 °C (Ugovšek in sod., 2011).

Opravljen je bil tudi strižni test v katerem so ugotovili, da so imeli največjo strižno trdnost preizkušanci, zlepljeni z UL brez dodanega NaOH, medtem ko so bile te vrednosti bistveno manjše pri preizkušancih ostalih skupin glede na vrednost pH. Preizkušanci, zlepljeni z UL vrednosti pH 0,24 in 1,63, so imeli podobno strižno trdnost. Preizkušanci iz ostalih dveh skupin z vrednostjo pH 2,8 in 5,2 pa so po 7 dneh, nekateri tudi po 3 dneh, razpadli. Strižna trdnost pri preizkušancih, zlepljenih z UL z negativnim pH, po daljšem času po lepljenju ni začela upadati, kar je zelo obetajoč rezultat (Ugovšek in sod., 2011).

Pri raziskavi so poleg ugotovitve o optimalni vrednosti pH (negativna) razložili tudi visok delež loma po lesu preizkušancev. Razlog visokega deleža loma po lesu pri UL z negativno vrednostjo pH je posledica degradacije površine lesa (preizkušancev iz bukovega lesa) v območju penetracije utekočinjenega lesa, saj jo le ta med lepljenjem zaradi svoje reaktivnosti močno poškoduje. Strižna trdnost preizkušancev je zmanjšana zaradi delno degradiranega lesa. Vrednost pH UL bistveno vpliva tudi na hitrost utrjevanja, saj sta z njo pogojeni reaktivnost UL in reakcija rekondenzacije, pri čemer se med lepljenjem tvori zamrežena struktura (Ugovšek in sod., 2011).

### 3 MATERIAL IN METODE

Celotno raziskavo smo izvedli v laboratorijih Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin. Zastavili smo jo tako, da smo najprej utekočinili les, nato smo pri različnih časih stiskanja (6 min, 9 min, 12 min, 15 min in 18 min) zlepili lamele v dvoslojne lepljence, katere smo nato razzagali na strižne preizkušance ustreznih dimenzij, kot jih določa standard. Testiranje preizkušancev je potekalo na trgalnem stroju Zwick, takoj po lepljenju, nato po enem dnevu, treh, sedmih, štirinajstih ter po osemindvajsetih dnevih. Pri vseh preizkušancih smo tudi vizualno ocenili lom po lesu lepilnega spoja.

#### 3.1 LES

Pri raziskavi smo uporabili les topola in les bukovine. Manjše frakcije žagovine topolovine so bile uporabljene za utekočinjen les, preizkušanci za ugotavljanje strižne trdnosti pa so bili izdelani iz bukovih lamel.

##### 3.1.1 Topol (*Populus ssp.*)

Znanih vrst topolov je okoli 40. V Sloveniji so avtohtoni črni (*Populus nigra* L.), beli (*Populus alba* L.) ter trepetlika (*Populus tremula* L.). Topoli so dokaj velika drevesa, saj dosegajo višine do 35 m in premere do 3 m. Njihova značilnost so hitra rast in dobra možnost uporabe klonov, zato se jih uporablja za gojenje v intenzivnih nasadih za proizvodnjo lesa. Prednost njihovih klonov so razmeroma dobre tehnične lastnosti lesa ter izjemno hitra rast. V mnogih evropskih deželah pokrivajo topolovi nasadi velike površine, v Sloveniji pa je tovrstna proizvodnja lesa le izjema, omejena na nekaj manjših zunaj gozdnih površin (Brus, 2008).

Les topola se zaradi homogene strukture le malo krči, ima dobro stabilnost ter visoko trdnost. Ni odporen proti atmosferiljam, insektom in glivam. Les je lahek, mehak in tehnično ne najbolj kakovosten, vendar uporaben tam, kjer bi bila uporaba boljšega lesa neracionalna. Iz njega izdelujejo dele pohištva, vezane plošče, zaboje in drugo embalažo, pribore za tehnično risanje, cokle, vžigalice, uporaben je kot gradben les in surovina za celulozo ter oglje za črni smodnik (Brus, 2008).

##### 3.1.2 Bukev (*Fagus sylvatica* L.)

Bukev je naš najbolj razširjen listavec in naša najpomembnejša lesna vrsta. Do sredine 19. stoletja so jo uporabljali skoraj izključno za kurjavo. Dosega višine do 30 m, priložnostno tudi preko 40 m, in premere 100 – 150 cm. V sestojih rastejo drevesa s polnolesnimi ravnimi debli. Dolžina debla brez vej znaša 15 m in več. Skorja je gladka, v starosti ima biserni lesk in je srebrnosive barve (Čufar, 2006).

Navadna bukev je naravno razširjena v večini srednje in zahodne Evrope, na severu jo najdemo še v južni Angliji in na južnem koncu Skandinavije. Raste tudi po južnoevropskih gorovjih, na primer v Pirenejih, Apeninah in Dinarskem gorovju. Na vzhodu raste vse do Ukrajine, na jugovzhodu pa še na Balkanskem polotoku. V Sloveniji je razširjena v nižinskem svetu severovzhodne in osrednje Slovenije in na suhih rastiščih sredozemskega sveta (Brus, 2008).

Les bukovine ima visoko gostoto, je trd in se zelo krči in nabreka. Stabilnost je neugodna, trdnostne lastnosti so glede na gostoto nadpovprečno visoke (npr. dobra upogibna trdnost), elastičnost je nižja. Les je zelo žilav, manj elastičen in zelo trden. Dobro se cepi in predvsem po parjenju se dobro upogiba. Nezaščitena bukovina je podvržena okužbi z glivami in insekti in je le zmerno trajna, zato je potrebna hitra in pravilna manipulacija po poseku. Z izjemo rdečega srca, ki je otiljen, se dobro impregnira (Čufar, 2006).

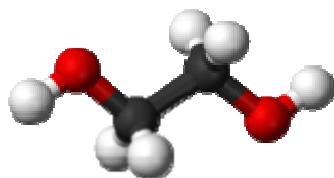
Bukov les je zaradi pogostosti in velikih dimenzij ob smreki naša gospodarsko najpomembnejša drevesna vrsta. Les je trd, težak, elastičen in na prostem slabše obstojen. Uporaben je za izdelavo pohištva, zlasti upognjenega, parketa, vezanih plošč in za železniške pragove, slabši les uporabljo celo za pridobivanje celuloze. Ima veliko ogrevalno moč, iz njega pridobivajo kakovostno oglje (Brus, 2008).

### 3.2 KEMIKALIJE

Pri degradaciji komponent lesa v utekočinjen les smo potrebovali etilen glikol kot reagent, 97 % žveplovo kislino kot katalizator ter 1,4-dioksan in vodo za redčenje.

#### 3.2.1 Etilen glikol

Etilen glikol ( $C_2H_4(OH)_2$ ) je alkohol z dvema -OH skupinama (slika 1). V svoji čisti obliki je brez barve, brez vonja, v sirupasti obliki pa sladkega okusa ter strupen. Ima molekulsko maso 62,068 g/mol in gostoto 1,1132 g/cm<sup>3</sup>. Tališče etilen glikola je -12,9 °C, vrelišče pri 197,3 °C in je topen v vodi v poljubnem razmerju. Je kemijska zmes, ki se širše uporablja v avtomobilski industriji kot sredstvo proti zamrzovanju (antifriz).



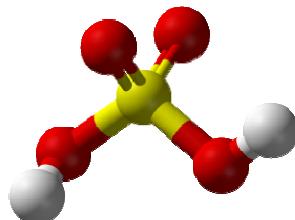
Slika 1: Etilen glikol

#### 3.2.2 Žveplova kislina

Žveplova (VI) kislina ( $H_2SO_4$ ) je brezbarvna oljnata tekočina gostote 1,84 g/cm<sup>3</sup> pri 20 °C (slika 2). Tališče ima pri 10 °C vrelišče pa 338 °C. Koncentrirana žveplova kislina je običajno 98 % in je izredno higroskopična (veže vodo celo iz organskih substanc, pri čemer te pooglenijo). Pri razredčevanju žveplove kisline z vodo se sprošča toplota (razredčujemo jo vedno s previdnim vlivanjem v mrzlo vodo in nikoli obratno).

Žveplova kislina je najmočnejša anorganska kislina in je tudi najpomembnejša kislina v kemijski industriji; približno polovica proizvodnje žvepla se uporabi v obliki žveplene

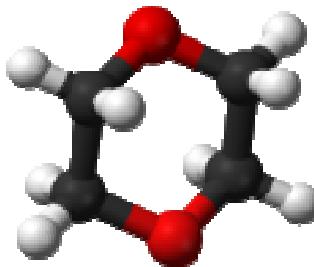
kisline v proizvodnji umetnih gnojil (superfosfat, amonijev sulfat). Uporablja pa se jo tudi pri izdelovanju umetnih mas, pralnih sredstev, eksplozivov, emulgatorjev, nekaterih barvil, zdravil, sulfatov, za luženje kovin, svinčene akumulatorje in v mnogih drugih primerih (Leksikon kemija, 2004).



Slika 2: Žveplova kislina

### 3.2.3 Dioksan

Dioksan ( $C_4H_8O_2$ ) je brezbarvna, gorljiva tekočina z rahlim vonjem po etru (slika 3). Nastaja tudi pri odcepu molekule vode iz molekule diglikola, ki je eter iz dveh molekul glikola. Dioksan je dobro topilo za celulozne derivate, maščobe, mineralna olja, smole, voske in je potencialno kancerogen (Leksikon kemija, 2004).



Slika 3: 1,4-Dioksan

## 3.3 UTEKOČINJANJE LESA

Za utekočinjanje lesa smo uporabili manjše frakcije topolove žagovine, ki smo jo morali posušiti. To smo izvedli v laboratorijskem sušilniku s temperaturo 103 °C. V sušilniku smo žagovino pustili približno 24 h, da se je posušila do absolutno suhe mase.

Utekočinjanje je potekalo v 1000 ml velikem steklenem reaktorju, ki je bil postavljen v posebno termično olje, ki je bilo segreto na temperaturo 180 °C. V steklen reaktor smo dali mešanico žagovine, reagenta in katalizatorja. Kot reagent za utekočinjanje smo uporabili etilen glikol in kot katalizator 97 % žveplovo kislino. Masno razmerje med topolom in etilen glikolom je bilo 1:1, dodatek katalizatorja pa je bil 3 % mase etilen glikola. Žagovina topola se je pod takimi pogoji utekočnjala približno 120 min.

V nadaljevanju smo morali utekočinen les prefiltrirati (slika 4), da smo odstranili netopne ostanke. Da smo ta postopek lažje opravili, smo utekočinen les najprej razredčili z zmesjo 1,4-dioksan in vode (masno razmerje 4:1), ter ga s pomočjo podtlaka prefiltrirali prek filtrirnih papirjev (Sartorius filter disks 388 grade/84/mm<sup>2</sup>). Filtrirne papirje smo nato osušili in jih stehtali. Na podlagi mas filtrirnih papirjev ter netopnega ostanka na njih, smo izračunali delež utekočinjenega lesa po enačbi (1).



Slika 4: Odstranjevanje netopnih ostankov



Slika 5: Laboratorij za izdelavo UL

$$DUL = \left( 1 - \left( \frac{\sum W_1 - \sum W_2}{W_3} \right) \right) \times 100\% \quad \dots(1)$$

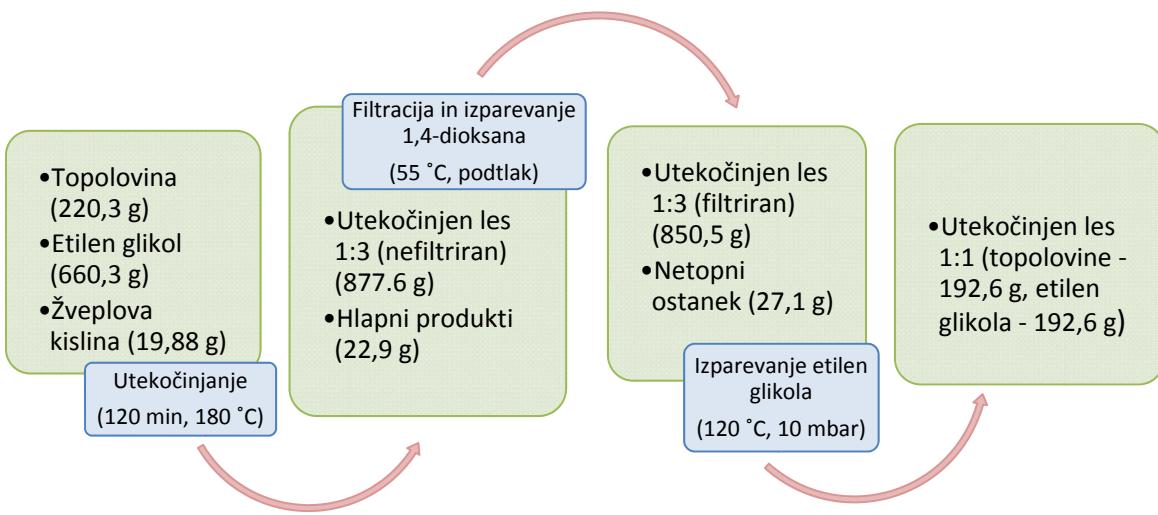
DUL = delež utekočinjenega lesa (%)

W<sub>1</sub> = masa suhega filtrirnega papirja z netopnim ostankom (g)

W<sub>2</sub> = masa filtrirnega papirja (g)

W<sub>3</sub> = masa topolovine (g)

Po končanem odstranjevanju netopnega ostanka smo morali odstraniti še 1,4-dioksan, vodo in nato še etilen glikol. Vse skupaj smo naredili s pomočjo rotavaporja (Buchi rotavapor R-210) in vakuumskih črpalk (Vacuubrand, PC 3003 VARIO). 1,4-dioksan smo odstranjevali pri temperaturi 55 °C ter pri prilagojenem višanju podtlaka do 10 mbar, kar je potekalo približno 1 uro. Odstranjevanje etilen glikola je potekalo nekoliko dlje (približno 2,5 ure), odstranili smo večji del etilen glikola pri temperaturi 120 °C in prav tako do 10 mbar podtlaka. Med izparevanjem etilen glikola smo maso utekočinjenega lesa spremljali gravimetrično s tehtanjem mase. Končni produkt z masnim razmerjem med topolovino in etilen glikolom 1:1 smo uporabili za nadaljnje raziskave.



Slika 6: Shematičen prikaz utekočinjenja lesa

### 3.4 LEPLJENJE LESENIH LAMEL Z UTEKOČINJENIM LESOM

Lepili smo lamele iz bukovega lesa, ki smo jih predhodno debelinsko poskobljali na debelino 5mm, s čimer smo zagotovili tudi čistost površine. Celoten proces stiskanja je potekal v skladu s predpisi standarda EN 12765 (2002). Na bukove lamele smo valjčno nanesli 200 g/m<sup>2</sup> utekočinjenega lesa (enostransko). V stiskalnici (slika 7) smo dvoslojne lepljence izpostavili temperaturi 200 °C, specifičnemu tlaku 0,6 MPa, čas stiskanja pa smo spremenjali.

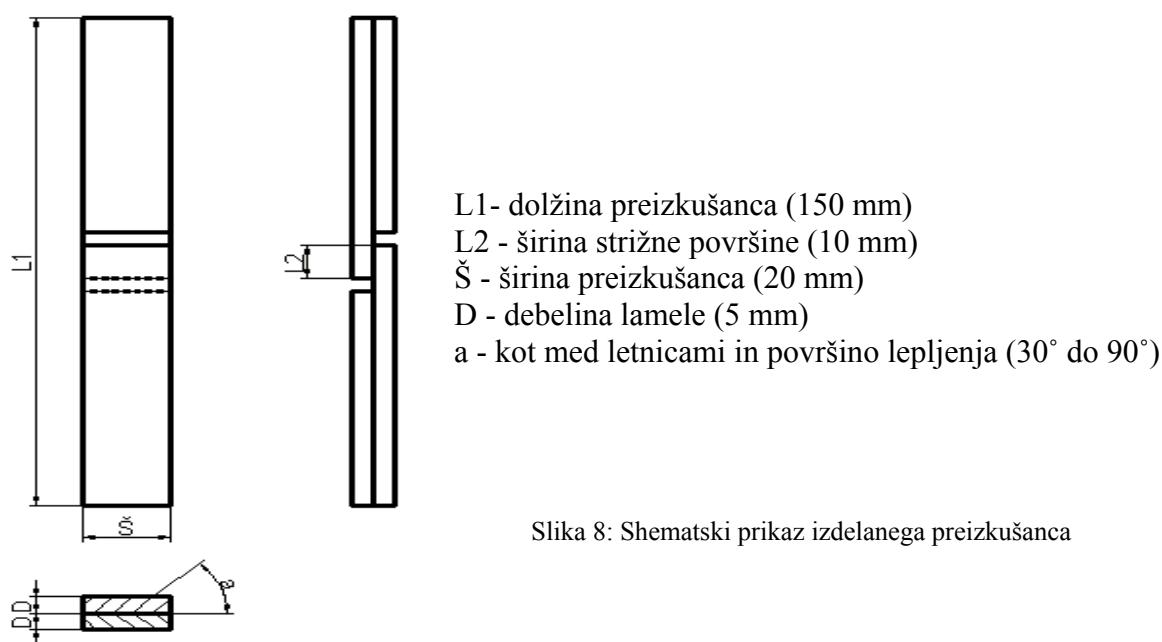
Ker je bil naš glavi cilj ugotoviti strižno trdnost lepilnih spojev zlepljenimi z UL pri različnih časih stiskanja, smo raziskavo opravili s časi stiskanja 6, 9, 12, 15 ter 18 minut. Za vsak čas stiskanja smo morali zlepiti po štiri pare lamel v dvoslojne lepljence, ki smo jih po končanem stiskanju takoj razžagali v strižne preizkušance.



Slika 7: Laboratorijska stiskalnica

### 3.5 IZDELAVA STRIŽNIH PREIZKUŠANCEV

Strižni preizkušanci so bili izdelani po predpisih standarda EN 205 (2003) (slika 8). Ta predpisuje, da morajo biti preizkušanci izdelani iz dveh 5 mm debelih, polradialnih ali radialnih bukovih lamel z gostoto  $700 \text{ kg/m}^3$  in 12 % ravnovesno vlažnostjo. Po stiskanju smo preizkušance razžagali na dimenzijske 150 x 20 mm in izdelali 10 mm široko strižno površino. Pri izdelavi strižne površine smo morali paziti, da je bila globina utora točno do lepilnega spoja. Vse preizkušance smo po končanem razžagovanju pravilno označili (čas stiskanja ter zaporedna številka preizkušanca) in jih nekaj, od vsakega časa stiskanja, naključno izbrali za takojšnje testiranje, ostale pa smo postavili v klimatiziran prostor s standardno klimo (temperatura  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , relativna zračna vlažnost  $(65 \pm 5)\%$ ).



Slika 8: Shematski prikaz izdelanega preizkušanca

### 3.6 TESTIRANJE STRIŽNE TRDNOSTI ZLEPLJENIH PREIZKUŠANCEV

Preizkušance smo prvič testirali takoj po lepljenju istega dne, nato pa smo meritve opravili po 1, 3, 7, 14 in 28 dneh. Za vsako testiranje smo porabili po 12 naključno izbranih preizkušancev za določen čas stiskanja, kar je pomenilo, da smo morali opraviti po 60 meritv na dan testiranja. Za vse skupaj smo morali pripraviti 360 ali več preizkušancev.

Testiranje smo opravljali na univerzalnem testirnem stroju ZWICK/Z005 (slika 9) v skladu s standardom EN 205 (2003). Vsakemu preizkušancu smo najprej izmerili dimenzijske strižne površine, jih vnesli v računalniški program ter preizkušanec vpeli v čeljusti naprave (slika 10) in ga nato natezno obremenjevali do porušitve. Računalniški program je nato na podlagi izmerjene sile ter izmerjenih dimenzijskih izračunal strižno trdnost lepilnega spoja po enačbi (2). Nato smo vse podatke prenesli v preglednico in na koncu še ocenili odstotek loma po lesu (z 0 %, če se je preizkušanec porušil po lepilnem spoju in 100 %, če je počil po lesu).



Slika 9: Univerzalni testirni stroj Zwick



Slika 10: Čeljusti testirnega stroja

$$f_v = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{l_2 \times b} \quad \dots(2)$$

$f_v$  = strižna trdnost ( $\text{N/mm}^2$ )

$F_{max}$  = maksimalna sila (N)

A = strižna površina ( $\text{mm}^2$ )

$l_2$  = dolžina strižne površine (mm)

b = širina strižne površine (mm)

## 4 REZULTATI

### 4.1 STRIŽNA TRDNOST ZLEPLJENIH SPOJEV Z UL PRI ČASU STISKANJA 6 MIN

V preglednici 1 so prikazane povprečne vrednosti strižne trdnosti ter ocene loma po lesu lepilnega spoja pri času stiskanja 6 min v odvisnosti od časa po lepljenju. Vrednosti so ponazorjene tudi grafično (slika 11 in slika 12).

Preglednica 1: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ter loma po lesu pri času stiskanja 6 minut v odvisnosti od časa po lepljenju

Število dni od zaključenega lepljenja	Čas stiskanja 6 min	
	$f_v$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ocena loma (%)
0	2,6	15
1	2,1	13
3	1,8	25
7	1,5	33
14	1,5	19
28	2,3	27

### 4.2 STRIŽNA TRDNOST ZLEPLJENIH SPOJEV Z UL PRI ČASU STISKANJA 9 MIN

V preglednici 2 so prikazane povprečne vrednosti strižne trdnosti ter ocene loma po lesu lepilnega spoja pri času stiskanja 9 min v odvisnosti od časa po lepljenju. Vrednosti so ponazorjene tudi grafično (slika 11 in slika 12).

Preglednica 2: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ter loma po lesu pri času stiskanja 9 minut v odvisnosti od časa po lepljenju

Število dni od zaključenega lepljenja	Čas stiskanja 9 min	
	$f_v$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ocena loma (%)
0	6,0	33
1	5,9	65
3	5,5	31
7	4,4	52
14	3,7	41
28	5,0	50

#### 4.3 STRIŽNA TRDNOST ZLEPLJENIH SPOJEV Z UL PRI ČASU STISKANJA 12 MIN

V preglednici so prikazane povprečne vrednosti strižne trdnosti ter ocene loma po lesu lepilnega spoja pri času stiskanja 12 min v odvisnosti od časa po lepljenju. Vrednosti so ponazorjene tudi grafično (slika 11 in slika 12).

Preglednica 3: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ter loma po lesu pri času stiskanja 12 minut v odvisnosti od časa po lepljenju

Število dni od zaključenega lepljenja	Čas stiskanja 12 min	
	$f_v$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ocena loma (%)
0	6,6	50
1	6,6	48
3	6,4	46
7	6,5	63
14	6,4	54
28	6,3	69

#### 4.4 STRIŽNA TRDNOST ZLEPLJENIH SPOJEV Z UL PRI ČASU STISKANJA 15 MIN

V preglednici so prikazane povprečne vrednosti strižne trdnosti ter ocene loma po lesu lepilnega spoja pri času stiskanja 15 min v odvisnosti od časa po lepljenju. Vrednosti so ponazorjene tudi grafično (slika 11 in slika 12).

Preglednica 4: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ter loma po lesu pri času stiskanja 15 minut v odvisnosti od časa po lepljenju

Število dni od zaključenega lepljenja	Čas stiskanja 15 min	
	$f_v$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ocena loma (%)
0	6,1	60
1	6,7	67
3	6,4	63
7	6,1	91
14	5,7	91
28	6,2	81

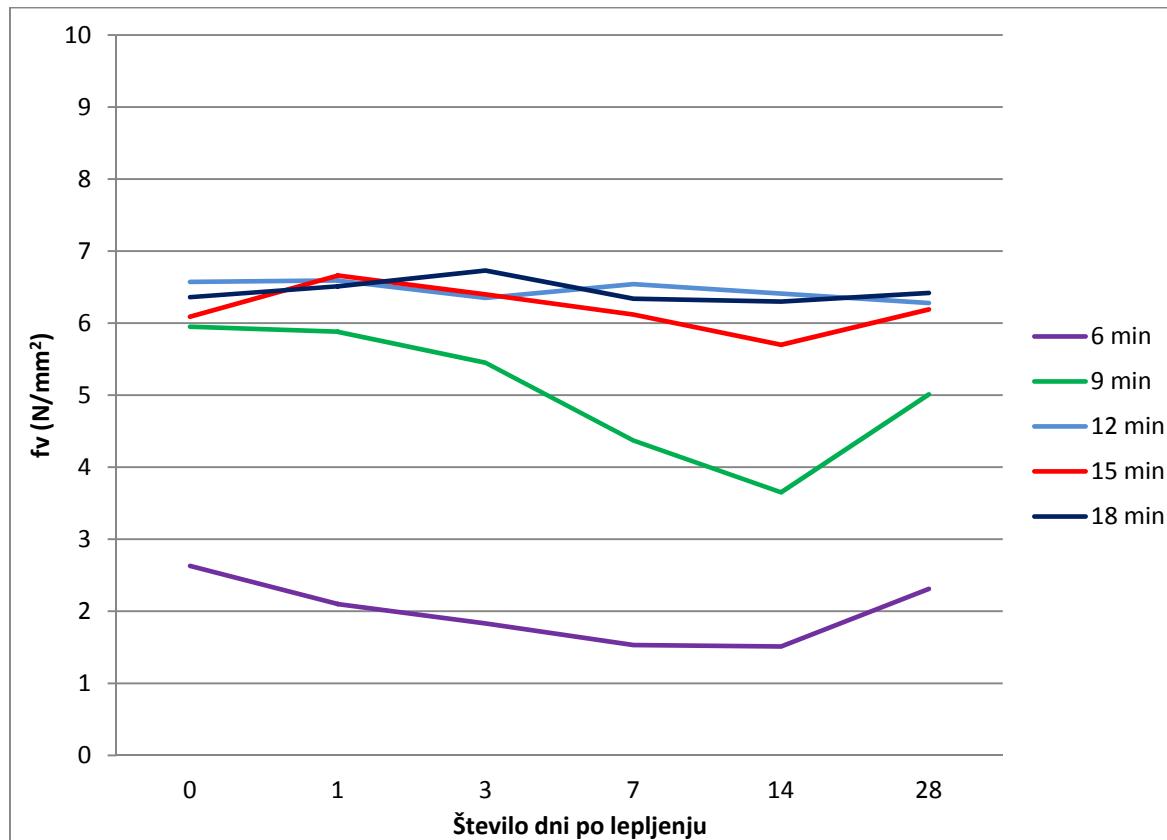
#### 4.5 STRIŽNA TRDNOST ZLEPLJENIH SPOJEV Z UL PRI ČASU STISKANJA 18 MIN

V preglednici so prikazane povprečne vrednosti strižne trdnosti ter ocene loma po lesu lepilnega spoja pri času stiskanja 18 min v odvisnosti od časa po lepljenju. Vrednosti so ponazorjene tudi grafično (slika 11 in slika 12).

Preglednica 5: Povprečne vrednosti strižne trdnosti ter loma po lesu pri času stiskanja 18 minut v odvisnosti od časa po lepljenju

Število dni od zaključenega lepljenja	Čas stiskanja 18 min	
	$f_v$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ocena loma (%)
0	6,4	94
1	6,5	85
3	6,7	100
7	6,3	100
14	6,3	98
28	6,4	96

#### 4.6 ODVISNOST STRIŽNE TRDNOSTI LEPILNEGA SPOJA IZ UL OD ČASA STISKANJA



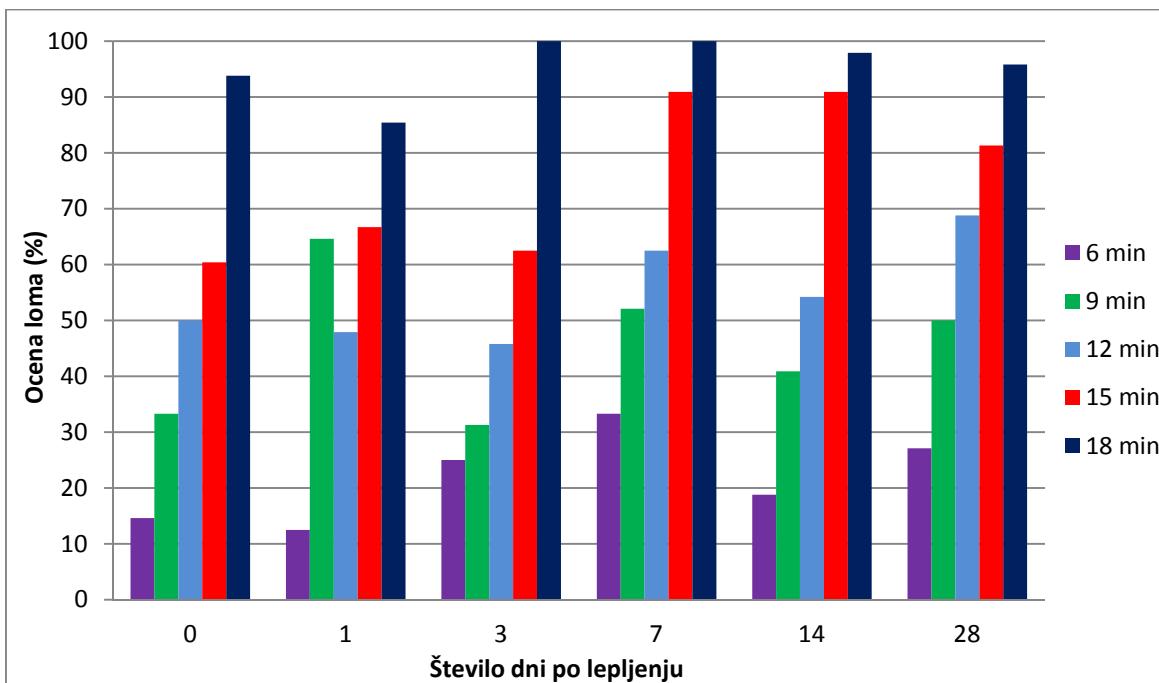
Slika 11: Strižna trdnost spojev iz utekočinjenega lesa glede na različne čase stiskanja v odvisnosti od časa po lepljenju

Na sliki 11 so prikazane povprečne vrednosti strižne trdnosti pri vseh petih različnih časih stiskanja v odvisnosti od časa po lepljenju. Standard EN 12765 (2002) predpisuje, da mora minimalna strižna trdnost dosegati vrednosti nad  $10 \text{ N/mm}^2$ , česar s tem utekočinjenim lesom in s temi časi stiskanja nismo mogli doseči.

Zelo podobne ter tudi najboljše rezultate so dosegli preizkušanci, ki so bili zlepljeni pri času stiskanja 12, 15 ter 18 min. Pri času stiskanja 12 min smo opazili zelo konstantne vrednosti; od najmanjše strižne trdnosti  $6,28 \text{ N/mm}^2$ , ki smo jo dosegli po 28 dneh po lepljenju ter do največje  $6,59 \text{ N/mm}^2$ , dosežene po enem dnevu. Pri času stiskanja 15 minut opazimo večje razlike; od  $5,7 \text{ N/mm}^2$  (po 14 dneh) do  $6,66 \text{ N/mm}^2$  (po 1 dnevu). Najboljši rezultat smo dosegli pri času stiskanja 18 minut, kjer je strižna trdnost znašala  $6,73 \text{ N/mm}^2$  po treh dneh po lepljenju.

Pri času stiskanja 9. minut opazimo zelo veliko padanje strižne trdnosti glede na čas po lepljenju. Najboljši rezultat je bil dosežen takoj prvi dan ( $5,95 \text{ N/mm}^2$ ), nato pa so rezultati močno padli do najmanjše vrednosti  $3,65 \text{ N/mm}^2$ . Proti koncu po 28 dneh pa lahko opazimo nenadno povečanje vrednosti z  $3,65$  na  $5,01 \text{ N/mm}^2$ .

#### 4.7 PRIMERJAVA OCENE LOMA PO LESU GLEDE NA ČAS STISKANJA



Slika 12: Primerjava loma po lesu v odvisnosti od časa stiskanja in glede na čas po lepljenju

Na sliki 12 so prikazane povprečne vrednosti (odstotki) ocen loma po lesu preizkušancev, zlepljenih pri vseh petih različnih časih stiskanja v odvisnosti od časa po lepljenju v standardnih pogojih. Ugotovimo lahko, da je lom po lesu v tesnem sorazmerju z strižno trdnostjo preizkušancev (daljši čas stiskanja pomeni večji odstotek loma po lesu, podobno kot velja tudi za strižno trdnost).

Pri vseh časih stiskanja so ocene loma dokaj konstantne glede na čas po lepljenju. Najboljše ocene so dosegli preizkušanci, zlepljeni s časom stiskanja 18 min. Vse ocene za ta čas stiskanja so se gibale nad 85 %. Najslabše rezultate pa so izkazovali preizkušanci zlepljeni s časom stiskanja 6 min. Te ocene so bile zelo slabe, od 15 % do 35 %. Pri tem času stiskanja smo zabeležili velik odstotek preizkušancev, ki so razpadli takoj po razzagovanju in tudi kasneje. Take preizkušance smo vseeno upoštevali v raziskavi in jim dali oceno 0 % loma po lesu ter strižno trdnost  $0 \text{ N/mm}^2$ .

## 5 RAZPRAVA IN SKLEPI

### 5.1 RAZPRAVA

Na podlagi predhodnih raziskav o utekočinjenem lesu, ki so bile narejene na Oddelku za lesarstvo, se je pokazalo pomanjkanje podatkov o samem postopku lepljenja/stiskanja. V raziskavi smo se osredotočili na vpliv časa stiskanja na strižno trdnost ter odstotek loma po lesu zlepljenih spojev v odvisnosti od časa po lepljenju.

Utekočinjanje lesa je potekalo na podlagi podatkov iz prejšnjih raziskav. Uporabili smo les topola, kot reagent za utekočinjanje smo uporabili etilen glikol, za katalizator pa žveplovo(VI) kislino. Celoten proces utekočinjanja je potekal v steklenem reaktorju približno 120 min, potrebna pa je bila še filtracija (odstranjevanje netopnih ostankov) ter odstranjevanje (izhlapevanje) vode, etilen glikola ter 1,4-dioksana, ki smo ga uporabili, razredčenega z vodo, za redčenje utekočinjenega lesa zaradi lažje filtracije.

Glavni namen raziskave je bil raziskati strižno trdnost preizkušancev, ki so bili zlepljeni pri različnih časih stiskanja. Zato smo v laboratoriju bukove lamele lepili v dvoslojne lepljence pri časih stiskanja 6, 9, 12, 15 ter 18 minut. Lamele so bile v stiskalnici izpostavljene temperaturi 200 °C in specifičnemu tlaku 0,6 MPa. Lepljence smo še isti dan razzagali na standardne preizkušance (slika 8).

Nato je sledilo testiranje preizkušancev na univerzalnem testirnem stroju Zwick. Za vsak časovni termin testiranja (0, 1, 3, 7, 14 in 28 dni po lepljenju) smo iz komore vzeli po 12 preizkušancev za vsak čas stiskanja. Vsak preizkušanec smo vpeli v čeljusti strižne naprave ter ga obremenili do porušitve in izračunali strižno trdnost spoja ter zabeležili oceno loma po lesu. Lom lahko poteka po lesu, kar pomeni 100 % lom po lesu, lahko pa poteka po lepilnem spoju, kar pomeni 0 % lom po lesu. V večini primerih smo lom težje ocenili, ker je potekal deloma po lesu in deloma po spoju. Zato smo ga ocenili z ocenami 25 %, 50 % ali 75 %.

Na podlagi rezultatov o strižni trdnosti lahko ugotovimo, da največja trdnost preizkušancev ne zadovoljuje zahtev standarda EN 12765 (2002), ki predpisuje minimalno strižno trdnost 10 N/mm<sup>2</sup>. Izmerjeni podatki so nam pokazali, da so najboljše rezultate dosegli preizkušanci, zlepljeni s časom stiskanja 12 min, 15 min in 18 min. Pri vseh smo opazili razmeroma podobne rezultate. Pri teh preizkušancih se strižna trdnost giblje okoli 6,5 N/mm<sup>2</sup>, kar je veliko boje od preostalih preizkušancev, ki so bili zlepljeni s časom stiskanja 9 ter 6 min (5 N/mm<sup>2</sup> oziroma 2 N/mm<sup>2</sup>).

Rezultati ocene loma so bili najboljši pri preizkušancih s časom stiskanja 18 minut, ki so znašali od 85 % do 100 % loma po lesu tudi 28 dni po lepljenju. 100 % lom po lesu pomeni, da je lepilni spoj trdnejši od samega lesa, kar pravzaprav želimo, ko lepimo dve lesni površini. Če je površina kakovostno zlepljena, so lastnosti (trdnost do porušitve) odvisne od samega lesa in ne od lepilnega spoja. Pri oceni loma lahko iz slike 12 razberemo, da se s podaljševanjem časa stiskanja lom po lesu povečuje. To je razvidno skoraj pri vseh terminih testiranja. Lahko pa predvidevamo, da se s podaljševanjem časa stiskanja nad 18 min ne bi veliko spremenilo, saj ta čas stiskanja že dosega skoraj najboljše možne rezultate.

Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da so za nadaljnje raziskave najbolj primerni preizkušanci, ki so bili zlepljeni s časom stiskanja 18 minut, saj so dosegli najboljše trdnostne rezultate. Ocena loma po lesu je bila tudi zelo dobra. Iz slike 11 in slike 12 razberemo tudi, da kakovost zlepljenosti teh preizkušancev ni odvisna od časa po lepljenju, saj so v vseh terminih testiranja dosegali podobne rezultate (strižna trdnost do  $6,73 \text{ N/mm}^2$ , lom po lesu do 100 %). Razlog, da so rezultati preizkušancev zlepljenih s časom stiskanja 6 ter 9 min tako slabi, je verjetno v tem, da utekočinjen les ni dovolj zamrežil oziroma utrdil, kar je posledica prekratkega delovanja tlaka in prenizke temperature na utekočinjen les.

## 5.2 SKLEPI

Na podlagi rezultatov opravljene raziskave lahko sklepamo, da:

- preizkušanci zlepljeni z utekočinjenim lesom pri kateremkoli poučevanem času stiskanja niso dosegli zahtev standarda EN 12765 (2002), ki predpisuje minimalno strižno trdnost  $10 \text{ N/mm}^2$ ,
- se strižna trdnost preizkušancev pri časih stiskanja 12, 15 ter 18 minut ni bistveno spremenjala glede na čas po lepljenju,
- je strižna trdnost preizkušancev pri časih stiskanja 6 in 9 minut v odvisnosti od časa po lepljenju močno padala,
- je bil čas stiskanja 12 minut optimalen glede na doseženo strižno trdnost, medtem ko je bil z vidika deleža loma po lesu najugodnejši čas stiskanja 18 minut.

Raziskava je pokazala, da se z različnimi časi stiskanja lahko izboljša trdnost lepilnega spoja in tako omogoči uporabo utekočinjenega lesa v proizvodnji, čeprav bo potrebno še marsikaj raziskati in storiti, da bo lepilo iz samo utekočinjenega lesa primerno za kakovostno lepljenje in bo dosegalo standardne trdnostne zahteve.

## 6 VIRI

- Bartol T., Bradač J., Hočevar I., Koler-Povh T., Siard N., Stopar K. 2001. Navodila za oblikovanje pisnih diplomskev in poddiplomskev izdelkov na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani. 1 - 32 str.
- Brus R. 2008. Dendrologija za gozdarje: študijsko gradivo. 2. Natis. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 137 str., 311str.
- Čufar K. 2006. Anatomija lesa; študijsko gradivo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta Oddelek za lesarstvo: 142 str., 151 str.
- Dioksin. 2010. Wikimedija Foundation Inc. 19.8.2011  
<http://sl.wikipedia.org/wiki/Dioksin> (10.9.2011)
- EN 12765. Razvrstitev duromernih lepil za nekonstrukcijsko uporabo. 2002: 1 - 8
- EN 205. Lepila - Lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo - Ugotavljanje natezno strižne trdnosti spojev s preklopom. 2003: 1 – 13
- Etilen glikol. 2010. Wikimedija Foundation Inc. 28.2.2011.  
<http://sl.wikipedia.org/wiki/Projekt:Etilenglikol> (10.9.2011)
- Kač M. 2004. Leksikon, Kemija. Ljubljana. Učila: 83 str., 117 str., 146 str., 440 str.
- Kranjec G. 2010. Strižna trdnost in trajnost spojev lepljenih z lepilom iz utekočinjenega lesa, Diplomski projekt. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta Oddelek za lesarstvo: 1 - 70 str.
- Tišler V. 2002. Utekočinjen les in njegova uporaba. Les wood, 54, 9: 281 - 284
- Ugovšek A., Budija F., Kariž M., Šernek M. 2011. The Influence of Solvent Content in Liquefied Wood and of the Addition of Condensed Tannin on Bonding Quality. Drvna industrija, 62, 2: 87 - 95
- Ugovšek A., Šernek M. 2009. Naravni materiali za izdelavo sodobnih lepil za les: tanin, lignin in utekočinjen les. Les wood, 61, 11/12: 451 - 458
- Ugovšek A., Šernek M. 2011. Kinetika in mehanizmi utekočinjenja lesa. Les wood, 63, 11/12: 405 - 411
- Ugovšek A., Šernek M. 2011. Vpliv vrednosti pH utekočinjenega lesa na strižno trdnost in trajnost zlepljenih spojev. Les wood, 63, 5: 232 - 237

Utekočinen les. 2009. Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS. objavljeno 13.1.2010.  
[http://videolectures.net/sadovi\\_kunaver\\_medved\\_utles](http://videolectures.net/sadovi_kunaver_medved_utles) (10.9.2011)

Žveplova kislina. 2009. Wikimedija Foundation Inc. 8.9.2011  
[http://sl.wikipedia.org/wiki/%C5%BDveplova\\_kislina](http://sl.wikipedia.org/wiki/%C5%BDveplova_kislina) (10.9.2011)

## ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Milanu Šerneku, za strokovno pomoč pri nastajanju in oblikovanju diplomskega projekta. Zahvalil bi se tudi recenzentu viš. pred. mag. Bogdanu Šegi, za strokovno mnenje o tem delu.

Zahvala gre tudi sodelavcema s Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin Mirku Karižu in Francu Budiji za tehnično pomoč. Velika hvala Alešu Ugovšku za pomoč pri izvedbi same raziskave.

Rad bi se iskreno zahvalil tudi vsem mojim bližnjim, ki so me med študijem iskreno spodbujali in podpirali.

## PRILOGE

Priloga A: Mase filtrov, ki so potrebne pri izračunu DUL po enačbi (1) (mase podane v gramih)

št.	$W_2$ (filter)	$W_1$ (fil+ ost)	št.	$W_2$ (filter)	$W_1$ (fil+ ost)	št.	$W_2$ (filter)	$W_1$ (fil+ ost)
1	0,359	0,836	24	0,345	0,847	47	0,347	0,664
2	0,348	0,857	25	0,338	0,902	48	0,361	0,821
3	0,337	0,763	26	0,329	0,855	49	0,342	0,668
4	0,348	0,793	27	0,351	0,878	50	0,345	0,676
5	0,340	0,578	28	0,341	1,225	51	0,342	0,792
6	0,356	0,731	29	0,336	0,628	52	0,336	0,685
7	0,336	0,599	30	0,351	0,811	53	0,343	1,187
8	0,339	0,684	31	0,332	0,938	54	0,334	0,755
9	0,359	0,657	32	0,325	0,848	55	0,327	0,705
10	0,330	0,688	33	0,332	0,508	56	0,337	0,677
11	0,332	0,698	34	0,339	0,629	57	0,334	0,646
12	0,337	0,763	35	0,330	0,587	58	0,334	0,731
13	0,342	0,615	36	0,336	0,686	59	0,348	0,685
14	0,341	0,679	37	0,336	0,678	60	0,326	0,683
15	0,333	0,673	38	0,334	0,599	61	0,330	0,711
16	0,338	0,729	39	0,327	1,028	62	0,326	0,747
17	0,347	0,766	40	0,328	0,611	63	0,331	0,718
18	0,342	0,672	41	0,339	0,754	64	0,335	0,779
19	0,336	0,890	42	0,342	0,710	65	0,336	0,510
20	0,351	0,911	43	0,339	0,817	66	0,340	0,545
21	0,348	0,879	44	0,325	0,667	67	0,336	0,355
22	0,355	0,779	45	0,341	0,755			
23	0,339	0,938	46	0,333	0,892			

Priloga B: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni takoj po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	19,88	10,26	204	819	4,02	0
2	20,00	10,31	206	1440	6,97	75
3	19,94	10,26	205	496	2,43	25
4	19,94	10,23	204	1020	4,98	50
5	19,94	10,23	204	1040	5,12	25
6	20,02	10,32	207	739	3,58	0
7	19,94	10,31	206	912	4,44	0
8					0	0
9					0	0
10					0	0
11					0	0
12					0	0
6 min dan 0						
Povprečje					2,63	14,6
St. odklon					2,55	24,9
KV					96,86	170,8

Priloga C: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni takoj po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,00	10,32	206	1300	6,29	75
2	19,87	10,38	206	437	2,12	100
3	19,95	10,40	207	924	4,45	50
4	20,07	10,39	209	1300	6,22	50
5	20,03	10,36	208	1280	6,18	0
6	19,92	10,36	206	1280	6,20	0
7	19,97	10,40	208	1570	7,58	25
8	19,98	10,28	205	1440	7,00	50
9	19,99	10,31	206	1060	5,14	0
10	20,00	10,31	206	1320	6,38	0
11	20,04	10,31	207	1380	6,68	25
12	19,85	10,40	206	1460	7,08	25
9 min dan 0						
Povprečje					5,95	33,3
St. odklon					1,47	32,6
KV					24,65	97,7

Priloga D: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni takoj po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	19,97	10,32	206	1370	6,64	50
2	19,86	10,36	206	1740	8,47	50
3	19,99	10,36	207	1710	8,28	75
4	19,99	10,27	205	1280	6,21	0
5	19,99	10,30	206	1400	6,78	50
6	19,92	10,26	204	1430	7,01	75
7	20,05	10,22	205	1300	6,35	100
8	20,01	10,28	206	1200	5,83	75
9	20,03	10,31	207	1280	6,21	100
10	20,03	10,22	205	1100	5,36	0
11	20,02	10,29	206	1130	5,49	25
12	19,98	10,24	205	1270	6,21	0
12 min dan 0						
Povprečje				6,57	50,0	
St. odklon				0,97	36,9	
KV				14,78	73,9	

Priloga E: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni takoj po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,07	10,20	205	1120	5,49	100
2	20,03	10,27	206	1480	7,20	100
3	19,92	10,27	205	1040	5,10	100
4	20,01	10,30	206	1380	6,68	25
5	20,01	10,28	206	1340	6,49	50
6	20,07	10,25	206	1490	7,26	75
7	20,03	10,31	207	1120	5,44	0
8	19,88	10,26	204	1710	8,39	25
9	20,02	10,23	205	1190	5,81	0
10	20,02	10,21	204	1220	5,95	100
11	20,06	10,29	206	682	3,30	100
12	20,03	10,35	207	1240	5,96	50
15 min dan 0						
Povprečje				6,09	60,4	
St. odklon				1,28	40,5	
KV				21,02	67,1	

Priloga F: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni takoj po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	19,93	10,34	206	1270	6,16	100
2	20,07	10,24	206	1090	5,31	100
3	20,07	10,28	206	1460	7,10	100
4	20,05	10,31	207	1280	6,20	100
5	20,05	10,31	207	1100	5,34	100
6	20,04	10,31	207	1270	6,13	100
7	19,95	10,27	205	1530	7,45	75
8	20,04	10,27	206	1270	6,18	50
9	20,01	10,27	206	1340	6,52	100
10	20,09	10,27	206	1410	6,85	100
11	20,03	10,25	205	1360	6,62	100
12	20,03	10,19	204	1320	6,47	100
18 min dan 0						
Povprečje				6,36		93,8
St. odklon				0,63		15,5
KV				9,92		16,6

Priloga G: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni 1 dan po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,16	10,35	209	1000	4,79	25
2	20,16	10,35	209	750	3,59	25
3	20,11	10,26	206	1230	5,94	50
4	20,08	10,26	206	398	1,93	25
5	20,16	10,30	208	900	4,34	25
6	20,11	10,35	208	492	2,36	0
7	20,00	10,29	206	468	2,27	0
8					0	0
9					0	0
10					0	0
11					0	0
12					0	0
6 min dan 1						
Povprečje				2,10		12,5
St. odklon				2,16		16,9
KV				102,85		134,8

Priloga H: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni 1 dan po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,16	10,24	206	905	4,38	100
2	20,10	10,17	204	1230	6,00	100
3	20,13	10,15	204	1340	6,57	50
4	20,06	10,33	207	1530	7,36	100
5	20,06	10,26	206	1600	7,80	75
6	20,06	10,19	204	1450	7,12	25
7	20,16	10,30	208	1580	7,60	25
8	20,07	10,28	206	1210	5,88	25
9	20,25	10,30	209	572	2,74	100
10	20,17	10,32	208	1410	6,77	100
11	20,18	10,32	208	971	4,66	0
12	20,23	10,23	207	756	3,65	75
9 min dan 1						
Povprečje				5,88	64,6	
St. odklon				1,66	37,6	
KV				28,18	58,3	

Priloga I: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni 1 dan po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,12	10,20	205	1200	5,86	100
2	20,12	10,18	205	1260	6,17	50
3	20,01	10,21	204	1230	6,03	100
4	19,96	10,24	204	1270	6,22	25
5	20,04	10,22	205	1190	5,83	75
6	20,04	10,20	204	1110	5,42	0
7	20,05	10,23	205	1320	6,42	50
8	20,17	10,25	207	1570	7,60	50
9	20,08	10,22	205	1320	6,44	25
10	20,12	10,31	207	1750	8,46	50
11	20,07	10,38	208	1550	7,45	25
12	20,19	10,36	209	1490	7,13	25
12 min dan 1						
Povprečje				6,59	47,9	
St. odklon				0,89	31,0	
KV				13,51	64,7	

Priloga J: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni 1 dan po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,07	10,25	206	1230	5,99	75
2	20,12	10,26	206	1510	7,30	100
3	20,08	10,30	207	1650	8,00	25
4	20,01	10,23	205	1510	7,39	50
5	20,05	10,20	205	1090	5,32	0
6	20,13	10,21	206	1460	7,09	75
7	20,07	10,25	206	1420	6,90	50
8	20,08	10,22	205	1390	6,76	75
9	20,07	10,19	205	1060	5,17	100
10	20,13	10,16	205	1240	6,08	100
11	20,07	10,24	206	1290	6,30	100
12	20,07	10,32	207	1590	7,67	50
15 min dan 1						
Povprečje				6,66	66,7	
St. odklon				0,9	32,6	
KV				13,54	48,9	

Priloga K: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni 1 dan po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,21	10,19	206	1490	7,22	100
2	20,13	10,18	205	1190	5,82	100
3	20,18	10,23	206	1420	6,88	100
4	20,04	10,23	205	1380	6,74	50
5	20,03	10,22	205	1370	6,72	75
6	20,02	10,23	205	1540	7,50	0
7	20,04	10,28	206	1450	7,04	100
8	20,16	10,26	207	1120	5,41	100
9	20,03	10,24	205	1360	6,64	100
10	20,21	10,26	207	1350	6,52	100
11	20,26	10,23	207	1040	5,00	100
12	20,13	10,20	205	1360	6,61	100
18 min dan 1						
Povprečje				6,51	85,4	
St. odklon				0,74	31,0	
KV				11,33	36,3	

Priloga L: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni 3 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,20	10,25	207	790	3,82	25
2	20,20	10,30	208	1050	5,06	25
3	20,24	10,25	207	573	2,76	50
4	20,19	10,28	208	155	0,75	25
5	20,20	10,34	209	660	3,16	75
6	20,18	10,34	209	573	2,74	25
7	20,21	10,30	208	769	3,70	75
8					0	0
9					0	0
10					0	0
11					0	0
12					0	0
6 min dan 3						
Povprečje					1,83	25,0
St. odklon					1,89	28,2
KV					103,10	11,8

Priloga M: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni 3 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,24	10,24	207	448	2,16	25
2	20,29	10,40	211	1020	4,84	25
3	20,30	10,40	211	1360	6,45	25
4	20,22	10,38	210	1050	5,00	75
5	20,24	10,38	210	1290	615	50
6	20,26	10,38	210	1430	6,79	0
7	20,28	10,36	210	1590	7,57	50
8	20,05	10,36	208	991	4,77	75
9	20,16	10,24	206	1340	6,50	25
10	20,16	10,16	205	882	4,30	25
11					0	0
12					0	0
9 min dan 3						
Povprečje					5,45	31,3
St. odklon					1,56	26,4
KV					28,68	84,4

Priloga N: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni 3 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,17	10,24	207	1370	6,65	25
2	20,20	10,26	207	1210	5,83	75
3	20,27	10,29	209	1170	5,60	0
4	20,23	10,23	207	1270	6,15	25
5	20,17	10,28	207	1350	6,51	50
6	20,29	10,32	209	1360	6,48	100
7	20,07	10,29	207	1170	5,69	25
8	20,11	10,32	208	1680	8,10	100
9	20,25	10,34	209	1390	6,65	50
10	20,23	10,34	209	1560	7,45	50
11	20,16	10,34	208	1320	6,31	25
12	20,22	10,34	209	991	4,74	25
12 min dan 3						
Povprečje				6,35	45,8	
St. odklon				0,87	31,7	
KV				13,77	69,1	

Priloga O: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni 3 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,28	10,25	208	1400	6,72	75
2	20,17	10,26	207	1320	6,37	100
3	20,23	10,20	206	1290	6,23	100
4	20,22	10,19	206	1180	5,72	25
5	20,18	10,18	205	1490	7,26	25
6	20,18	10,21	206	1630	7,91	25
7	20,28	10,33	209	1310	6,26	25
8	20,23	10,20	206	1340	6,49	75
9	20,20	10,25	207	1260	6,09	25
10	20,17	10,23	206	1300	6,28	75
11	20,25	10,25	208	1160	5,61	100
12	20,11	10,15	204	1200	5,87	100
15 min dan 3						
Povprečje				6,4	62,5	
St. odklon				0,65	34,5	
KV				10,19	55,3	

Priloga P: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni 3 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,07	10,20	205	1270	6,20	100
2	20,24	10,18	206	1630	7,91	100
3	20,13	10,18	205	1230	6,03	100
4	20,24	10,14	205	1430	6,94	100
5	20,26	10,18	206	1550	7,51	100
6	20,11	10,18	205	1490	7,29	100
7	20,11	10,14	204	1440	7,07	100
8	20,25	10,19	206	1400	6,77	100
9	20,23	10,19	206	1080	5,23	100
10	20,18	10,23	206	1650	7,99	100
11	20,20	10,22	206	1240	6,02	100
12	20,12	10,14	204	1170	5,74	100
18 min dan 3						
Povprečje				6,73		100
St. odklon				0,88		0
KV				13,14		0

Priloga Q: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni 7 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	19,94	10,31	206	344	1,67	0
2	20,10	10,22	205	150	0,73	0
3	20,05	10,27	206	414	2,01	25
4	20,08	10,22	205	597	2,91	100
5	20,14	10,21	206	913	4,44	100
6	19,98	10,28	205	612	2,98	100
7	20,03	10,25	205	731	3,56	75
8				0		0
9				0		0
10				0		0
11				0		0
12				0		0
6 min dan 7						
Povprečje				1,53		33,3
St. odklon				1,63		45,6
KV				106,82		136,9

Priloga R: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni 7 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,25	10,09	204	891	4,36	50
2	20,30	10,09	205	1240	6,05	100
3	20,26	10,09	204	1110	5,42	25
4	20,35	10,09	205	1230	6,00	50
5	20,12	10,09	203	1300	6,43	75
6	20,33	10,11	206	1110	5,42	100
7	20,11	10,16	204	871	4,26	100
8	20,20	10,12	204	852	4,17	50
9	20,23	10,20	206	1150	5,58	50
10	20,17	10,19	206	973	4,73	25
11					0	0
12					0	0
9 min dan 7						
Povprečje				4,37	52,1	
St. odklon				2,17	36,1	
KV				49,66	69,3	

Priloga S: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni 7 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,30	10,11	205	1290	6,27	100
2	20,25	10,09	204	1160	5,66	25
3	20,14	10,16	205	1090	5,34	50
4	20,21	10,10	204	1350	6,63	50
5	20,22	10,16	205	1380	6,73	75
6	20,24	10,20	206	1270	6,16	100
7	20,30	10,15	206	1470	7,12	25
8	20,17	10,14	205	1280	6,26	50
9	20,31	10,09	205	1290	6,31	25
10	20,23	10,09	204	1600	7,83	100
11	20,29	10,09	205	1490	7,29	100
12	20,26	10,09	204	1400	6,84	50
12 min dan 7						
Povprečje				6,54	62,5	
St. odklon				0,69	31,1	
KV				10,58	49,7	

Priloga T: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni 7 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,27	10,20	207	985	4,77	100
2	20,25	10,12	205	1400	6,83	100
3	20,25	10,11	205	1170	5,73	100
4	20,26	10,19	206	1570	7,60	100
5	20,12	10,18	205	1590	7,75	50
6	20,32	10,18	207	1380	6,65	50
7	20,36	10,18	207	1400	6,76	100
8	20,36	10,18	207	1340	6,45	100
9	20,08	10,25	206	1030	5,00	100
10	20,20	10,23	207	1120	5,41	100
11	20,25	10,11	205	886	4,33	100
15 min dan 7						
Povprečje				6,12	90,9	
St. odklon				1,14	20,2	
KV				18,70	22,2	

Priloga U: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni 7 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,28	10,06	204	1500	7,35	100
2	20,30	10,16	206	1620	7,84	100
3	20,29	10,11	205	1440	7,00	100
4	20,28	10,11	205	1480	7,23	100
5	20,07	10,12	203	1460	7,19	100
6	20,28	10,15	206	1560	7,56	100
7	20,17	10,22	206	1110	5,37	100
8	20,34	10,19	207	860	4,15	100
9	20,25	10,15	206	1280	6,21	100
10	20,32	10,19	207	1230	5,93	100
11	20,17	10,16	205	1020	4,99	100
12	20,22	10,18	206	1080	5,24	100
18 min dan 7						
Povprečje				6,34	100	
St. odklon				1,19	0	
KV				18,83	0	

Priloga V: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni 14 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,22	10,14	205	309	1,51	0
2	20,19	10,23	207	654	3,17	25
3	20,21	10,14	205	635	3,10	25
4	20,17	10,17	205	408	1,99	50
5	20,06	10,18	204	976	4,78	50
6	20,21	10,16	205	107	0,52	25
7	20,19	10,15	205	613	2,99	50
8					0	0
9					0	0
10					0	0
11					0	0
12					0	0
6 min dan 14						
Povprečje					1,51	18,8
St. odklon					1,67	21,7
KV					111,14	115,5

Priloga W: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni 14 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,10	10,32	207	1080	5,22	100
2	20,23	10,18	206	458	2,22	100
3	20,34	10,32	210	904	4,31	50
4	20,24	10,19	206	1140	5,55	0
5	20,25	10,19	206	979	4,75	0
6	20,25	10,19	206	723	3,50	100
7	20,11	10,19	205	976	4,76	50
8	20,20	10,19	206	1080	5,24	50
9	20,16	10,23	206	942	4,57	0
10					0	0
11					0	0
9 min dan 14						
Povprečje					3,65	40,9
St. odklon					2,03	43,7
KV					55,54	106,8

Priloga X: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni 14 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,18	10,18	205	1220	5,96	100
2	20,19	10,18	206	1170	5,72	100
3	20,12	10,15	204	1270	,2	25
4	20,25	10,18	206	1230	5,98	0
5	20,17	10,19	206	1190	5,80	100
6	20,26	10,19	206	1320	6,39	25
7	20,28	10,17	206	1320	6,41	25
8	20,13	10,18	205	1280	6,26	25
9	20,23	10,18	206	1650	8,01	75
10	20,20	10,18	206	1530	7,45	75
11	20,28	10,18	206	1310	6,34	75
12	20,14	10,18	205	1510	7,39	25
12 min dan 14						
Povprečje				6,41	54,2	
St. odklon				0,70	36,7	
KV				10,97	67,7	

Priloga Y: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni 14 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,26	10,25	208	1390	6,69	100
2	20,23	10,28	208	958	4,61	100
3	20,21	10,18	206	881	4,28	100
4	20,27	10,18	206	1020	4,95	100
5	20,28	10,14	206	645	3,14	100
6	20,29	10,17	206	1430	6,94	100
7	20,18	10,18	205	1340	6,55	50
8	20,26	10,19	206	1400	6,80	50
9	20,36	10,19	207	1580	7,60	100
10	20,31	10,17	207	1230	5,94	100
11	20,20	10,32	208	1090	5,24	100
15 min dan 14						
Povprečje				5,70	90,9	
St. odklon				1,37	20,2	
KV				23,94	22,2	

Priloga Z: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni 14 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,29	10,17	206	1290	6,26	100
2	20,25	10,17	206	1320	6,42	100
3	20,29	10,20	207	1640	7,93	100
4	20,26	10,16	206	1010	4,92	100
5	20,09	10,16	204	1180	5,77	100
6	20,30	10,17	206	1130	5,49	100
7	20,23	10,16	206	1460	7,12	75
8	20,33	10,18	207	1370	6,60	100
9	20,38	10,23	208	1490	7,16	100
10	20,27	10,22	207	1250	6,03	100
11	20,21	10,23	207	1160	5,63	100
12	20,24	10,22	207	1180	5,70	100
18 min dan 14						
Povprečje				6,30	97,9	
St. odklon				0,87	7,2	
KV				13,78	7,4	

Priloga AA: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 6 minut in preizkušeni 28 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,23	10,22	207	653	3,16	25
2	20,19	10,20	206	798	3,87	50
3	20,23	10,23	207	1010	4,90	75
4	20,16	10,19	205	731	3,56	75
5	20,15	10,21	206	856	4,16	50
6	20,20	10,24	207	860	4,16	25
7	20,18	10,23	206	814	3,94	25
8				0	0	0
9				0	0	0
10				0	0	0
11				0	0	0
12				0	0	0
6 min dan 28						
Povprečje				2,31	27,1	
St. odklon				2,08	29,1	
KV				89,96	107,5	

Priloga BB: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 9 minut in preizkušeni 28 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,41	10,19	208	1450	6,99	100
2	20,36	10,24	208	1260	6,06	75
3	20,21	10,24	207	1530	7,41	100
4	20,30	10,24	208	1480	7,13	100
5	20,30	10,24	208	1160	5,59	25
6	20,26	10,21	207	1240	5,98	75
7	20,23	10,22	207	1120	5,42	0
8	20,14	10,20	205	1130	5,49	25
9					0	0
10					0	0
9 min dan 28						
Povprečje				5,01	50,0	
St. odklon				0,80	40,1	
KV				15,97	80,2	

Priloga CC: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 12 minut in preizkušeni 28 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,28	10,20	207	1150	5,57	75
2	20,26	10,22	207	1250	6,02	0
3	20,34	10,22	208	915	4,40	100
4	20,31	10,24	208	1260	6,06	25
5	20,31	10,27	209	1270	6,07	75
6	20,24	10,18	206	1410	6,84	100
7	20,33	10,26	209	1450	6,95	100
8	20,00	10,23	208	1450	6,97	50
9	20,21	10,23	207	1370	6,62	100
10	20,18	10,21	206	1530	7,44	100
11	20,32	10,31	209	1340	6,42	50
12	20,27	10,26	208	1240	5,96	50
12 min dan 28						
Povprečje				6,28	68,8	
St. odklon				0,80	33,9	
KV				12,73	49,3	

Priloga DD: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 15 minut in preizkušeni 28 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,33	10,24	208	886	4,26	75
2	20,29	10,24	208	1420	6,81	100
3	20,27	10,20	207	1770	8,55	100
4	20,23	10,19	206	1520	7,38	50
5	20,31	10,31	209	1630	7,76	50
6	20,32	10,28	209	1420	6,78	25
7	20,41	10,24	209	1260	6,01	100
8	20,44	10,25	210	1280	6,11	100
9	20,32	10,28	209	1670	7,99	100
10	20,30	10,25	208	1300	6,25	75
11	20,22	10,06	203	328	1,61	100
12	20,23	10,20	206	977	4,73	100
15 min dan 28						
Povprečje				6,19		81,3
St. odklon				1,91		26,4
KV				30,94		32,5

Priloga EE: Strižna trdnost in lom po lesu preizkušancev, ki so bili stiskani 18 minut in preizkušeni 28 dni po lepljenju.

Št.	$l_2$ mm	b mm	A $\text{mm}^2$	F N	$f_v$ $\text{N/mm}^2$	Ocena loma %
1	20,39	10,20	208	1270	6,11	100
2	20,32	10,19	207	1430	6,92	100
3	20,29	10,22	207	1650	7,95	100
4	20,38	10,15	207	1440	694	100
5	20,38	10,15	207	1410	6,79	100
6	20,38	10,21	208	1460	7,00	100
7	20,31	10,22	208	1460	7,02	50
8	20,19	10,22	206	1220	5,89	100
9	20,31	10,25	208	1280	6,17	100
10	20,26	10,23	207	964	4,65	100
11	20,27	10,23	207	1170	5,62	100
12	20,22	10,16	205	1230	6,01	100
18 min dan 28						
Povprečje				6,42		95,8
St. odklon				0,86		14,4
KV				13,34		15,1

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Luka Žakelj

**VPLIV ČASA STISKANJA NA TRDNOST  
LEPILNEGA SPOJA IZ UTEKOČINJENEGA LESA**

DIPLOMSKI PROJEKT  
Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

Ljubljana, 2012